

采用低温膨化技术制备速溶型磷酸二氢钾

王科丽

(中轻依兰(集团)有限公司, 云南 昆明 650117)

[摘要] 在农业无人机喷施(飞防)领域中, 晶体型及粉碎研磨型磷酸二氢钾(KH_2PO_4)存在溶解速率缓慢、喷头堵塞频发及复配相容性差等核心技术瓶颈, 本研究基于“低温蒸发-瞬间释压”核心原理, 开发了适用于 KH_2PO_4 工业化生产的低温膨化技术。通过对现有生产装置进行精准改造与工艺参数优化, 成功实现高膨化速溶 KH_2PO_4 产品的工业化生产。该产品呈中空多孔“爆米花”结构, 300倍稀释条件下自然沉降溶解时间仅3 s, 无需搅拌入水即溶, 实现即投即用、无沉淀、无残渣, 30 d加速储存无结块。工业化运行数据表明, 项目总投资200万元, 建成年产2万t生产线, 2022—2024年累计实现净利润719.74万元, 投资回收期仅0.83年。本研究为传统磷化工装置的绿色低碳升级提供了可复制的技术路径, 对推动高端水溶肥产业国产化、助力精准农业发展具有重要工程实践意义。

[关键词] 磷酸二氢钾; 速溶; 低温膨化技术; 飞防专用肥; 设备改造; 工艺优化; 产业化效益

[中图分类号] TQ126.3'5 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2026) 02-0057-05

Preparation of instantly soluble potassium dihydrogen phosphate using low-temperature expansion technology

WANG Keli

(Zhongqing Yilan (Group) Co., Ltd., Kunming 650117, China)

Abstract: In the field of agricultural drone spraying (aerial application), crystalline and ground-milled potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) face core technical bottlenecks such as slow dissolution rates, frequent nozzle clogging, and poor compatibility. Based on the core principle of “low-temperature evaporation-instant pressure release”, a low-temperature expansion (LTE) technology suitable for the industrial production of KH_2PO_4 is developed. Through precise modification of existing production equipment and optimization of process parameters, the industrialized production of highly expanded, instantly soluble KH_2PO_4 is successfully achieved. The product exhibits a hollow porous “popcorn-like” structure, with a natural settling dissolution time of only 3 s under 300-fold dilution, dissolving immediately upon contact with water without stirring, leaving no sediment or residue, and showing no caking after 30 days of accelerated storage. Industrial operation data indicate that with a total investment of 2 million RMB Yuan, an annual production line of 20 000 tons is established. From 2022 to 2024, the cumulative net profit reaches 7.197 4 million RMB Yuan, with an investment payback period of only 0.83 years. This study provides a replicable technical model for the green and low-cost upgrading of traditional phosphochemical equipment, holding significant engineering practical value for promoting the localization of high-end water-soluble fertilizers and supporting the development of precision agriculture.

Key words: potassium dihydrogen phosphate; instantly soluble; low-temperature expansion technology; specialized fertilizer for aerial application; equipment modification; process optimization; industrialization benefits

0 引言

磷酸二氢钾(KH_2PO_4)作为一种高效的磷钾复合肥与工业助剂^[1-2], 其应用效能高度依赖于物理

形态与理化特性。目前市售磷酸二氢钾产品以晶体型和粉碎研磨型为主, 普遍存在溶解速率低的问题(晶体型完全溶解常需数分钟)^[3], 难以满足现代农

收稿日期: 2025-11-02

作者简介: 王科丽(1976—), 女, 云南石屏人, 彝族, 工程师, 从事磷化工生产管理工作。

业飞防与精准灌溉中即配即用的时效要求，并伴随喷头堵塞、复配性差等痛点^[4]。长期以来，国内在速溶型 KH_2PO_4 产品研发方面基本处于空白状态，高端产品依赖进口，制约了我国水溶肥产业的高质量发展与飞防技术的全面推广^[5]。行业亟须一种能够在低温条件下实现 KH_2PO_4 结构重构与性能提升的新型工艺，突破传统结晶与粉碎路径的技术壁垒。

中轻依兰（集团）有限公司（以下简称依兰公司）基于现有生产装置，以低成本改造、高附加值产出为原则，历经 18 个月的系统研发与中试验证，成功开发出适用于 KH_2PO_4 的低温膨化技术，并实现工业化生产，填补了国内速溶磷酸二氢钾产品的技术空白，为传统磷化工装置的绿色升级提供了新路径^[6]。

1 技术原理与工艺设计

基于我国磷酸二氢钾生产的技术瓶颈及产业需求，本节从低温膨化技术核心机制、关键设备改造及工艺参数优化 3 方面，系统阐述速溶 KH_2PO_4 的工业化生产方案，重点突出技术创新性与工程可行性。

1.1 低温膨化技术核心机制

低温膨化技术通过 4 阶段精准控制，在避免 KH_2PO_4 高温分解的前提下重构其微观结构，实现速溶与抗结块性能协同提升，各阶段工艺原理与控制要点如下。

1) 料液预处理与老化

将质量分数 40%~50% 的 KH_2PO_4 溶液输送至带温控夹套的老化罐，在 80~90 °C、搅拌转速 30 r/min 条件下进行老化处理，该温度区间可抑制溶液中 KH_2PO_4 晶体过早析出，既保障料液均一性，又避免后续管道及喷枪堵塞。

2) 雾化与低温膨化

预处理后的料液经高压喷枪（工作压力 0.6~1.0 MPa，喷嘴孔径 5~10 mm）雾化后喷入膨化塔。塔内通过逆向热风维持塔顶与底部约 40 °C 的温度梯度；在避免物料局部焦化的同时促使雾滴内部水分缓慢蒸发，累积蒸汽压。

3) 结构成型

当雾滴内部蒸汽压突破表层张力时，发生瞬间释压膨胀，体积骤增，形成蓬松、多孔、中空的无规则蓬松颗粒，为快速溶解提供通道。

4) 充分干燥

膨胀后的颗粒，与 300~400 °C 热风逆流接

触，实现深度干燥。最终产品 $w(\text{H}_2\text{O}) \leq 0.4\%$ ，经皮带输送至密闭料仓储存，储存过程中 $w(\text{H}_2\text{O})$ 稳定控制在 $\leq 0.5\%$ ，满足《肥料级磷酸二氢钾》（HG/T 2321—2016）优级品指标要求^[7]。

1.2 关键设备改造与利旧方案

以“利旧为基、精准升级”为原则，针对原生产装置中与 KH_2PO_4 生产不匹配的设备模块进行改造，改造方案及性能对比如表 1 所示。改造重点解决原装置“易堵、产品均一性差、储存结块”三大问题^[6]。

表 1 关键设备改造方案与性能对比

Table 1 Key equipment retrofitting plan and performance comparison

改造部位	核心改造措施	改造前状态	改造后技术效果
老化罐系统	增设温控装置	无温控装置，易结晶堵管，产品质量不稳定	料液均一性提升，无结晶堵塞，产品一次合格率从 60% 提升至 90%
雾化系统	改变喷枪雾化方式	颗粒较细，产品为晶体与粉末混合态	雾化均匀，颗粒蓬松多孔
原料储存系统	新增原料储存槽	无专用原料储存设施，影响连续性生产	实现原料缓冲，保障连续稳定运行
产品输送系统	改变物料运输方式	物料在运输过程中易吸潮 ($w(\text{H}_2\text{O}) > 1.0\%$)，长期储存易结块	产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 降至 0.4% 以下，长期储存无结块

1.3 工艺参数优化

以溶解时间为评价指标，采用 $L_9(3^4)$ 正交实验，通过实验考察料液 $w(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ (A)、料液温度 (B)、喷枪压力 (C) 及热风温度 (D) 4 个因素的影响，实验方案与极差分析结果分别如表 2、表 3 所示。

表 2 正交实验因素水平

Table 2 Orthogonal experimental factor level

水平	A(料液 $w(\text{KH}_2\text{PO}_4)/\%$)	B(料液温度/°C)	C(喷枪压力/MPa)	D(热风温度/°C)
1	42	80	0.6	300
2	45	85	0.7	340
3	48	90	0.8	400

在正交实验极差分析中，理论最优组合为 A2B2C2D3（即料液 $w(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 45%、料液温度 85 °C、喷枪压力 0.7 MPa、热风温度 400 °C），该组合是基于各因素水平均值计算得出的理想条件。然而，在实际实验中，第 5 组 (A2B2C3D1) 表现出更优的综合性能：溶解时间最短 (3.0 s)，优于理论组合的预估值；产品纯度稳定在 99.0% 以上，满足优级品标准；热风温度较低 (300 °C)，相较于

表3 L₉ (3⁴) 正交实验结果与极差分析

Table 3 L₉ (3⁴) Orthogonal experimental results and range analysis

实验号	料液 w(KH ₂ PO ₄)/%	料液 温度/℃	喷枪 压力/MPa	热风 温度/℃	溶解 时间/s	产品纯 度/%
1	42	80	0.6	300	5.2	99.7
2	42	85	0.7	340	3.5	99.8
3	42	90	0.8	400	4.8	99.6
4	45	80	0.7	400	3.1	99.9
5	45	85	0.8	300	3.0	99.8
6	45	90	0.6	340	4.2	99.7
7	48	80	0.8	340	6.3	99.5
8	48	85	0.6	400	5.7	99.6
9	48	90	0.7	300	6.1	99.5
K ₁	4.50	4.87	5.03	4.77		
K ₂	3.43	4.07	4.23	4.67		
K ₃	6.03	5.03	4.70	4.53		
极差R	2.60	0.96	0.80	0.24		

D3水平(400℃),单位产品能耗降低约16%,更符合工业化生产的节能与经济性要求。

因此,综合溶解性能、产品纯度与生产成本,最终确定A2B2C3D1为工业化生产的最佳控制条件。这一选择体现了工程实践中“技术可行、经济合理”的优化原则。

2 产品性能表征与质量验证

为验证低温膨化技术的实用性,从微观结构、溶解与储存稳定性及产品质量3方面,对KH₂PO₄产品进行系统表征,并与传统晶体型、粉碎研磨型产品对比,突出其技术优势与质量优势。

2.1 微观结构分析

3种KH₂PO₄产品的外观形态如图1所示。



图1 不同形态KH₂PO₄的外观对比

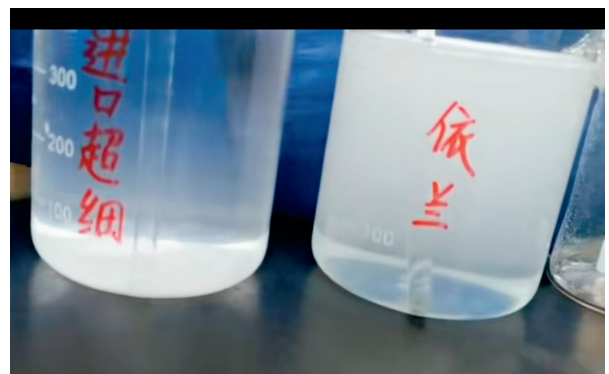
Fig. 1 Appearance comparison of different forms of KH₂PO₄

通过电子显微镜观察:晶体型KH₂PO₄呈规整六方晶体结构,表面光滑无孔隙,粒径分布不均,颗粒间接触面积大,易发生团聚。粉碎研磨型产品呈不规则碎屑状,表面粗糙,且存在大量细粉,易吸潮结块。低温膨化技术的KH₂PO₄产品呈典型“爆米花”状,蓬松、中空多孔结构,粒径均一,颗粒间以点接触为主,可显著减少团聚与吸潮。该中空多孔结构使低温膨化技术KH₂PO₄产品的松密度达0.3~0.5 g/cm³水平,比表面积大,为快速溶解提供了充足的固液接触面积。

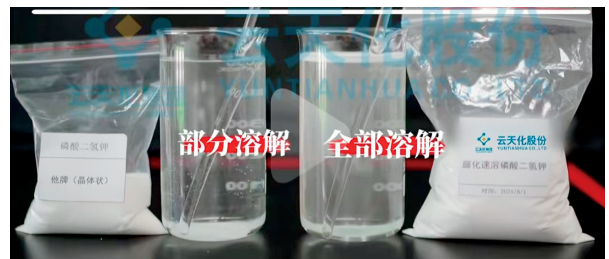
2.2 溶解与储存稳定性

2.2.1 溶解性能

在25℃、300倍去离子水中进行自由沉降溶解实验,不同产品自由沉降溶解过程对比见图2。低温膨化技术KH₂PO₄产品在下沉过程中即完全溶解,耗时仅3s(烧杯可视溶解气泡,底部无沉淀物)。进口超细产品(粉碎研磨型)部分溶解、部分沉淀,经搅拌后完全溶解需13s(烧杯底部可见部分沉淀物)。其他品牌晶体型产品大部分迅速沉底,搅拌后完全溶解需105s(烧杯底部积存不溶



a. 进口超细(粉碎研磨型)产品与依兰KH₂PO₄产品溶解效果对比



b. 其他品牌晶体型产品与依兰KH₂PO₄产品溶解效果对比

图2 不同产品自由沉降溶解过程对比

Fig. 2 Comparison of free sedimentation and dissolution processes of different products

物)。

2.2.2 储存稳定性

在 25 ℃、相对湿度 75% 的恒温恒湿箱中进行 30 d 加速储存实验，结果显示：低温膨化技术 KH_2PO_4 产品，30 d 无结块倾向，倾倒时流动性良好。晶体型，部分结块，需外力破碎才能分散。粉碎研磨型，部分结块，形成坚硬块状，需外力破碎才能分散，无法直接使用^[7]。

低温膨化技术 KH_2PO_4 产品优良的抗结块性能^[7]，归因于其中空多孔结构减少了颗粒间接触面积，削弱了毛细管桥接作用（水分在颗粒间形成的毛细管力降低）。

2.3 产品质量验证

采用低温膨化技术生产的磷酸二氢钾产品，其核心理化指标显著优于《肥料级磷酸二氢钾》(HG/T 2321—2016) 肥料级行业标准^[7]，如表 4 所示。

表 4 低温热膨化技术产品磷酸二氢钾指标

项目	规格	$w(\text{KH}_2\text{PO}_4)$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{H}_2\text{O})$	$w(\text{Cl})$	$w(\text{水不溶物})$
行业标准	优等品	≥98.0	≥51.0	≥33.8	≤0.5	≤1.0	≤0.3
	一等品	≥96.0	≥50.0	≥33.2	≤1.0	≤1.5	≤0.3
	合格品	≥94.0	≥49.0	≥30.5	≤1.5	≤3.0	≤0.3
低温热膨化技术产品	优等品	≥99.0	≥52.0	≥34	≤1.0	≤0.05	≤0.1
	一等品	≥99.0	≥52.0	≥34	≤1.5	≤0.2	≤0.2
	合格品	≥97.0	≥50.0	≥33	≤2.0	≤3.0	≤0.5

低温热膨化技术产品中，优等品与一等品的 KH_2PO_4 质量分数（以干基计）分别达到 ≥99.0% 与 ≥99.0%，满足行业优等品（≥98.0%）要求，合格品标准高出行业标准 3 个百分点。关键组分纯度提升显著；对应地，水溶性 P_2O_5 的质量分数亦分别达到 ≥52%，高于行业优等品指标（≥51.0%），体现出更优的养分含量与工艺水平。

这一领先的产品质量体系，为 KH_2PO_4 定位高端肥料市场奠定了坚实的基础，并为市场营销提供了强有力的品质背书。

3 产业化经济效益分析

基于上述技术与应用优势，本项目以 200 万元总投资建成年产 2 万 t KH_2PO_4 产品生产线，2022—2024 年工业化运行数据见表 5。

表 5 2022—2024 年 KH_2PO_4 产销量及效益

项目	销量/t	销售收入/万元	总成本/万元	净利润/万元	单位产品净利润/(元·t ⁻¹)	传统晶体产品单位产品净利润/(元·t ⁻¹)
2022年	1 762.72	2 025.32	1 688.69	336.63	1 909.73	520 ~ 680
2023年	1 338.40	1 362.61	1 147.01	215.60	1 610.87	550 ~ 720
2024年	989.27	900.56	733.05	167.51	1 693.31	580 ~ 750
合计	4 090.39	4 288.49	3 568.75	719.74		

由表 5 可知，项目经济效益显著。

1) 投资回收能力

3 年累计净利润 719.74 万元，投资回收期（静态）= 总投资/年均净利润 = 200 / (719.74/3) = 0.83 年，远低于磷化工行业平均投资回收期（3 ~ 5 年）。

2) 盈利能力

在统计期间， KH_2PO_4 产品单吨净利润稳定在 1 600 元以上，为传统晶体产品的 2.3 ~ 3.7 倍，主要得益于其高端市场定位（售价 1.1 万 ~ 1.2 万元/t，传统晶体产品售价 0.6 万 ~ 0.7 万元/t）。

3) 成本控制

能耗成本占总成本比例仅 9.3%，低于行业平

均水平（12% ~ 15%），体现了低温膨化技术的节能优势。

此外，项目还产生显著间接效益：带动上游 KH_2PO_4 原料需求增长，为传统磷化工企业转型升级提供了可复制的盈利模式。

4 结论与展望

4.1 主要结论

1) 技术创新性 成功构建了“低温蒸发-瞬间释压”低温膨化技术工艺体系，生产出的 KH_2PO_4 产品具有密度低（0.3 ~ 0.5 g/cm³），比表面积大、溶解迅速（3 s）、储存稳定性好（30 d 无结块）等优异特性，有效解决了传统产品在飞防应用中的核

心痛点。

2) 产业化成效 项目设备利旧率达85%,以200万元的投资实现了2万 t/a的产能,投资回收期仅0.83年,单吨净利润约1 600元,为传统磷化工装置升级提供了可复制的技术范例。

3) 应用价值 产品在实际飞防作业中表现卓越,做到即投即用、无沉淀、无残渣,喷头堵塞问题完全消除,主要技术指标高于行业标准3百分点,有力支撑了精准农业的发展,也为 KH_2PO_4 定位高端肥料市场奠定了坚实的技术基础,并为市场营销提供了强有力的品质背书。

4.2 技术推广路径与社会效益

技术推广方面,低温膨化技术工艺具备良好的通用性与可移植性,可在同类水溶性肥料(如尿素、硫酸钾等)生产中推广应用,推动行业向绿色、节能、高值化方向转型。社会效益层面,本项目不仅提升了农业飞防作业效率与施肥精度,也有助于降低农药浪费与面源污染,符合国家“减肥减药”绿色农业政策导向。未来,随着微量元素复合膨化肥料系列的开发与AI(人工智能)控制系统的引入,本技术将在特色经济作物营养强化与智能制造方面发挥更大价值。

[参考文献]

[1] 黄美英,蒋德敏,钟本和,等.磷酸二氢钾结晶工艺控制研究[J].

化工矿物与加工,2018,47(12):13-18.

HUANG M Y, JIANG D M, ZHONG B H, et al. Study on crystallization process of potassium dihydrogen phosphate [J]. Industry Minerals & Processing, 2018,47(12):13-18.

[2] 吴宇川,何兵兵,薛绍秀,等.磷酸二氢钾的制备与应用研究进展[J].磷肥与复肥,2017,32(2):30-34.

WU Y C, HE B B, XUE S X, et al. Research progress on preparation and application of potassium dihydrogen phosphate [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(2):30-34.

[3] 伊跃军,马亚梦,谭秀民,等.水溶性肥料的发展现状及对策[J].安徽农业科学,2016,44(3):153-155.

YI Y J, MA Y M, TAN X M, et al. Development status and countermeasures of water soluble fertilizer [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016,44(3):153-155.

[4] 中国农业科学院.农用无人机施药技术规范:NY/T 3213—2018[S].北京:中国农业出版社,2018.

[5] 罗宗恬.氮肥企业联产甲酸钾、磷酸二氢钾和氯基三元复合肥技术[J].化肥工业,2017,44(3):53-55.

LUO Z T. Technology of co-production of potassium formate-monopotassium phosphate chlorine-based NPK compound fertilizer for nitrogenous fertilizer enterprise [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2017,44(3):53-55.

[6] 陆春宏,刘佳,曾波,等.磷酸二氢钾制备工艺综述[J].云南化工,2019,46(4):20-22.

LU C H, LIU J, ZENG B, et al. Summary of process for production of potassium dihydrogen phosphate [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019,46(4):20-22.

[7] 中华人民共和国工业和信息化部.肥料级磷酸二氢钾:HG/T 2321—2016[S].北京:化学工业出版社,2016.

(上接第34页)

[11] 邢小霞.多效蒸发器、连续结晶器在硫酸铵生产中的应用分析[J].化工管理,2015(3):165.

[12] 武海丽.硫酸铵结晶过程及DP结晶器系统研究[D].天津:天津大学,2014.

WU H L. Research of Ammonium Sulfate Crystallization Process and Double Propeller Crystallizer[D]. Tianjin:Tianjin University, 2014.

[13] 樊玉光,魏婷,华和维.降温速率对过硫酸铵结晶介稳区影响的研究[J].无机盐工业,2014,46(10):23-25.

FAN Y G, WEI T, HUA H W. Study on effects of cooling rate on ammonium persulfate's crystallization metastable zone [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2014,46(10):23-25.

[14] 徐欢欢.硫酸铵结晶工艺研究[D].石家庄:河北科技大学,2012.

XU H H. Study on the Crystallization Process of Ammonium

Sulfate[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2012.

[15] 殷萍,卫宏远.pH值对硫酸铵溶解度及结晶介稳区的影响[J].化学工业与工程,2009,26(2):137-140.

YIN P, WEI H Y. Effect of pH on the Solubility and Metastable Crystallization Zone of Ammonium Sulfate[J]. Chemical Industry and Engineering, 2009,26(2):137-140.

[16] 李先华,党乐平,殷萍,等.硫酸铵蒸发结晶过程影响因素研究[J].无机盐工业,2008,40(11):40-43.

LI X H, DANG Y P, YIN P, et al. Influence factors of evaporation crystallization of ammonium sulfate [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2008,40(11):40-43.

[17] 殷萍.硫酸铵蒸发结晶过程研究[D].天津:天津大学,2007.

YIN P. Study on Evaporation Crystallization Process of Ammonium Sulfate[D]. Tianjin:Tianjin University, 2007.